

УДК 536.532

О. В. Кочан¹**БЕЗДЕМОНТАЖНИЙ МЕТОД ТЕСТУВАННЯ СТАНУ
ЕЛЕКТРОДІВ ТЕРМОЕЛЕКТРИЧНИХ ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ**¹Тернопільський національний економічний університет

Створено метод тестування стану термоелектричних перетворювачів на місці їх експлуатації шляхом визначення еквівалентного часу їх експлуатації. Метод не вимагає демонтажу термоелектричних перетворювачів, проводиться в процесі їх експлуатації. Умовою проведення тестування є сталість температури робочого кінця на час тестування. Отриманий еквівалентний час експлуатації термоелектричного перетворювача дає можливість визначити його місце у моделі похибки дрейфу функції перетворення та набутої термоелектричної неоднорідності.

Ключові слова: термоелектричні перетворювачі, похибка від неоднорідності термодар, тестування на місці експлуатації.

Вступ

Термопари (ТП) на сьогодні залишаються дуже поширеними сенсорами температури вищої 600 °С. Але вони є найменш точною ланкою вимірювального каналу, бо їх електроди деградують під дією температури експлуатації [1, 2]. Методи корекції похибок ТП, розроблені за останні роки, дозволяють значно підвищити точність вимірювання температури [3, 4]. Але вони трудомісткі та мають обмежені можливості. Дійсним є правило — якщо менша похибка, то менша необхідна точність корекції, а відтак менше затрат вона потребує. Тому заміна ТП є заходом, що дозволяє надійно підвищити точність вимірювання температури. Але обґрунтована відповідь на питання коли саме слід замінити ТП невідома. Визначення строку експлуатації ТП за результатами експериментальних досліджень [5, 6] не враховує індивідуальних особливостей ТП і умов її експлуатації. Ця оцінка має орієнтовний характер.

Час експлуатації ТП, на перший погляд, вигідно установлювати якнайдовшим — зменшуються затрати на самі ТП, їх заміну і зупинку експлуатації обладнання. Але втрати через недостатню точність вимірювання та регулювання теж бувають значними. Тому важливою є своєчасна заміна ТП. Заміна за результатами періодичної перевірки в лабораторії неефективна через трудомісткість. Заміна за фіксований час, за який ТП гарантовано мало деградує, збільшує затрати. Тому створення методу тестування ТП на місці її встановлення без переривання експлуатації є актуальною задачею.

1. Міра деградації термоелектродів ТП

Причин деградації електродів ТП багато (окислення, напруження в кристалах, дифузія). Всі вони діють одночасно з різною інтенсивністю. Тому швидкість деградації залежить від умов експлуатації ТП — вимірюваної температури, наявності та складу в оточенні речовин, що впливають на швидкість тих чи інших деградаційних процесів, термоударів, вібрації тощо. Прямі методи визначення ступеня деградації ТП на сьогодні невідомі. Зазвичай про деградацію судять за зміною функції перетворення (ФП) ТП.

Традиційним методом визначення відхилень ФП ТП від номінальної та її змін, є періодична перевірка в спеціалізованій лабораторії [4, 8]. Однак вона має найвищу трудомісткість. Кращими є методи визначення відхилень ФП ТП на місці експлуатації [7]. Однак температурні калібратори [7] поки що не випускаються. А використання взірцевої ТП на місці експлуатації [6, 9] також трудомістке (вимагає обладнання, відповідного до взірцевої ТП) і суперечить стандартам на експлуатацію взірцевого обладнання.

Найменш трудомісткими є методи, що базуються на ефекті Пельтьє [10, 11]. Однак в джерелах [10, 11] не наведено аналіз похибок цих методів, а тому їх застосування вимагає відповідного обґрунтування. Зв'язок між визначеним на певний час відхиленням ФП ТП від номінальної та ступенем деградації термоелектродів ТП також не достатньо вивчений. Таке відхилення відповідає похибці цієї ТП на час її визначення [12, 13]. Але не визначає його місце ТП у загальній картині процесу деградації термоелектродів. Тому вибір зміни ФП ТП як міри деградації термоелектродів не можна вважати найкращим рішенням.

Пропонується для оцінки ступеня деградації термоелектродів вибрати еквівалентний час експлуатації ТП. Цей час може бути рівним фізичному часу експлуатації ТП, якщо умови експлуатації близькі до умов експериментального дослідження змін ФП однотипних ТП під дією основних величин впливу. За інших умов експлуатації еквівалентний час не рівний фізичному. Якщо умови експлуатації сприятливі (відсутні шкідливі домішки, термоудари тощо), то еквівалентний час експлуатації ТП буде меншим фізичного. Якщо умови експлуатації жорсткі, то еквівалентний час експлуатації ТП буде більшим фізичного.

Загалом еквівалентний час експлуатації певної ТП має вказувати його місце у загальній математичній моделі змін ФП ТП, побудованій на базі результатів експериментальних досліджень. Основою для визначення еквівалентного часу експлуатації може служити виявлена у [14] взаємно-однозначна залежність між дрейфом ФП ТП і похибкою від набутої під час експлуатації неоднорідності її термоелектродів. Зокрема, максимальні значення цих похибок для певної ТП в кожному момент часу рівні. Еквівалентний час експлуатації повинен узгодити результати поточних оцінок складових похибки та фізичного часу їх визначення із згаданою загальною математичною моделлю змін ФП ТП. В такому разі еквівалентний час експлуатації дозволить оцінити похибки ТП різного виду у його подальшій експлуатації. Зокрема, оцінити невиключену похибку відомих методів корекції та ухвалити обґрунтоване рішення про доцільність або необхідність заміни ТП.

Таким чином, визначення еквівалентного часу експлуатації ТП дає змогу комплексної оцінки стану її термоелектродів, що забезпечує кращі умови для вирішення питання про доцільність або необхідність заміни ТП. *Метою статті* є створення методу тестування ТП на місці їх експлуатації шляхом визначення еквівалентного часу її експлуатації.

2. Метод тестування термопар

Як було вказано, похибки дрейфу ФП ТП та набутої неоднорідності є проявами однієї причини — деградації термоелектродів під дією часу експлуатації за високої температури [14]. Знаючи одну з цих похибок під дією величини, що на неї впливає, можна оцінити іншу похибку під дією відповідної величини, що впливає. Зокрема, визначивши (експериментально) похибку від набутої неоднорідності (зміну генерованої термо-е.р.с. від дії заданої зміни профілю температурного поля вздовж термоелектродів), можна оцінити відповідний дрейф ФП ТП. А знаючи: фізичний час і температуру експлуатації ТП (відповідні йому похибки від набутої неоднорідності та дрейфу згідно з моделлю); дійсні (визначені експериментально) похибки від набутої неоднорідності та дрейфу; можна однозначно оцінити еквівалентний час експлуатації ТП. За оцінкою еквівалентного часу експлуатації ТП можна оцінити подальші похибки від набутої неоднорідності та дрейфу її ФП в певних умовах експлуатації та порівняти їх з допустимими [15].

Для реалізації пропонованого методу необхідно змінити заданим чином профіль температурного поля вздовж термоелектродів в зоні ТП, що генерує основну термо-е.р.с. (рис. 1), тобто зна-

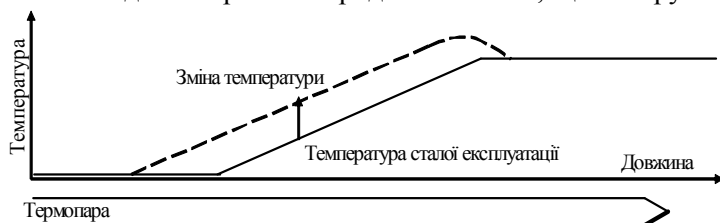


Рис. 1. Профілі температурного поля вздовж термоелектродів під час проведення тестування

диться в області градієнту профілю температурного поля об'єкта вимірювання температури. Зміну проводять коли температура робочого та вільних кінців є постійною — коли сталі умови експлуатації, споживана або генерована потужність, за результатами вимірювання температури об'єкта іншими давачами, тощо.

В результаті пропонованої зміни профілю температурного поля ділянки ТП, що генерують основну термо-е.р.с., змінять температуру. Якщо електроди не деградували (є однорідними), то сумарна термо-е.р.с. ТП мало зміниться (відповідно до малої початкової неоднорідності ТП). Якщо елект-

роди деградували, то сумарна термо-е.р.с. ТП зміниться значно більше — відповідно до набутої при експлуатації термоелектричної неоднорідності [16].

Слід зазначити, що зміна профілю температурного поля в зоні, яка знаходиться в рівномірному температурному полі, теж дає змогу оцінити степінь деградації термоелектродів у цій зоні. Однак зона у рівномірному температурному полі генерує відносно малу термо-е.р.с. Тому її похибка мало впливає на похибку вимірювання температури. Визначення степені деградації термоелектродів у такій зоні не доцільне.

За зміною термо-е.р.с. ТП знайдемо еквівалентний час її експлуатації. Нехай дрейф ФП ТП $E_{\Sigma DR}^T$, знайдений за результатами експериментальних досліджень однотипних ТП в аналогічних умовах експлуатації, буде

$$E_{\Sigma DR}^T = \sum_{i=1}^n E_{DRi} = \sum_{i=1}^n \phi_i(t_{Ei}, t_{Di}, \tau), \quad (1)$$

де n — номер ділянки, на якій умовно розбита ТП (згідно з [5], умовою розбиття є мала різниця дрейфів ФП для температур кінців ділянок, якою можна нехтувати); t_{Ei} — температура експлуатації i -ї ділянки, причому $i = \overline{1, n}$; t_{Di} — температура, в якій i -та ділянка опинилася після зміни профілю температурного поля; τ — фізичний час експлуатації ділянок (ТП в цілому).

Похибки від набутої неоднорідності та дрейфу ФП ТП є проявами деградації термоелектродів, вони можуть бути обчислені на основі (1). Обчислюючи дрейф ФП ТП, слід вважати $t_{Di} = t_{Ei}$, а змінною буде час експлуатації τ . Для обчислення похибки від набутої неоднорідності для моменту зміни профілю температурного поля $\tau = \text{const}$, а $t_{Di} \neq t_{Ei}$.

Нехай в результаті зміни профілю температурного поля при тестуванні отримаємо експериментальне значення зміни генерованої ТП термо-е.р.с. $\Delta E_{\Sigma NEOD}^E$, викликане термоелектричною неоднорідністю її електродів. Для таких умов експлуатації обчислимо, на основі (1), теоретичне значення цієї зміни $\Delta E_{\Sigma DR}^T$, що відповідає новим значенням t_{Ei} та t_{Di} (у цьому випадку $t_{Di} \neq t_{Ei}$). Якщо температура робочого кінця залишається сталою, то зміну генерованої ТП термо-е.р.с. $\Delta E_{\Sigma NEOD}^E$ можна повністю віднести до прояву похибки неоднорідності ТП.

Таким чином, в ідеальному випадку, має виконуватися рівність

$$\Delta E_{\Sigma NEOD}^E = \sum_{i=1}^n \phi_i(t_{Ei}, t_{Di}, \tau) - \sum_{i=1}^n \phi_i(t_{Ei}, t_{Ei}, \tau). \quad (2)$$

Якщо (2) справджується, то тестована ТП експлуатується в умовах, що в цілому відповідають умовам дослідження однотипних ТП, її похибки визначаються за результатами експериментальних досліджень. Якщо (2) не справджується, то тестована ТП: експлуатується в інших умовах; має значні індивідуальні властивості. В обох випадках можна знайти такий еквівалентний час τ_E її експлуатації, що відповідав би часу експлуатації досліджуваних ТП (щодо степені деградації термоелектродів, тобто похибки тестованої ТП). Умову, що дозволяє визначити τ_E , можна сформулювати як

$$\Delta E_{\Sigma NEOD}^E - \sum_{i=1}^n \phi_i(t_{Ei}, t_{Di}, \tau_E) - \sum_{i=1}^n \phi_i(t_{Ei}, t_{Ei}, \tau_E) \rightarrow 0. \quad (3)$$

Значення τ_E з умови (3) може бути знайдене довільним методом. Якщо функції ϕ_i задані аналітично та є однорідними, доцільний аналітичний розв'язок. Інакше можна застосувати довільні чисельні методи (поділу відрізка навпіл, Ньютона, хорд тощо). Слід зазначити, що похибка визначення τ_E , по відношенню до похибки вимірювання температури, є похибкою другого степеня малості, тому висока точність його знаходження не потрібна.

Знаючи τ_E , можна згідно з (1) визначити: відповідні максимальні межі дрейфу ФП ТП; максимальну похибку від набутої неоднорідності (за характерних для певного об'єкта вимірювання змінах профілю температурного поля). Знаючи ці похибки можна також ухвалити рішення про заміну ТП.

3. Конструктивна схема ТП з самотестуванням

Пропонований метод доцільно реалізувати, максимально використавши елементи наявних ТП у поєднанні з ТП нової конструкції, запропонованої у [17]. Конструктивна схема такого ТП подана на рис. 2. В її склад входять електроди основної 1 та додаткової 2 ТП, захисний металевий або керамічний чохол 3, чотириканальні ізоляційні буси 4, одна з яких, 5, має довжину, що приблизно відповідає довжині зони градієнта профілю температурного поля об'єкта вимірювання температури (див. рис. 1). Крім того, в склад пропонованого ТП входять нагрівач 6, розміщений на поверхні втулки 5, та головка ТП 7, яка має чотири контакти 8.

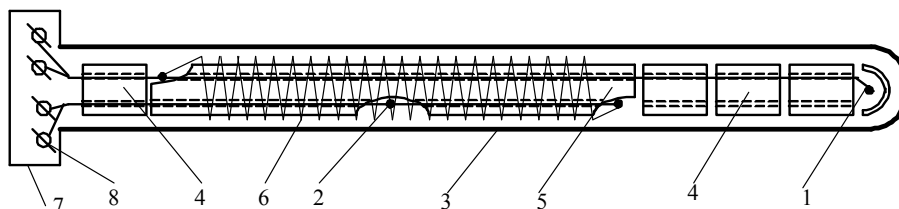


Рис. 2. Конструктивна схема пропонованого ТЕР із самотестуванням

Коли вмикається нагрівач 6, міняється профіль температурного поля вздовж електродів ТП 1 (штрихова лінія рис. 1). Зміну профілю контролюють в одній точці ТП 2 (див. рис. 2). За відомою за результатами вимірювання ТП 2 можна приблизно оцінити зміну профілю температурного поля. Для цього можна використати аналітичний розв'язок рівняння теплопровідності вздовж корпусу 3 або результати експериментальних досліджень макету ТП. Отримані значення температури t_{Di} використовують під час складання умови (3).

Для використання в пропонованій ТП деталей серійних ТП доцільно нагрівач 6 виконати як напилене покриття (металом або сплавом) однієї ізоляційної буси 5. Буса 5 має приблизно відповідати довжині зони градієнту профілю температурного поля об'єкта вимірювання. Залежно від потрібного опору наплення роблять суцільним або спіральним. Для розміщення робочого кінця ТП 2 у центрі втулки 5 роблять виріз (після наплення), що відкриває два канали втулки 5. Саме в ці канали протягують електроди ТП 2. Електроди ТП 1 протягують в інші канали. Виводи нагрівача 6 приварюють до робочого кінця ТП 2 (до її робочого кінця приварюють провідник) та до одного з електродів ТП 1. Нагрівач 6 підключається між ТП 1 і 2. Таким чином, крім втулки 5 (з нагрівачем 6), решта деталей пропонованої ТП із самотестуванням повністю відповідають деталям серійних ТП.

Схема підключення пропонованої ТП показана на рис. 3. Підключення нагрівача 6 між ТП 1 і 2 мало на меті зменшення кількості контактів пропонованої ТП до чотирьох (головки з подвійними ТП). Вимірювально-керувальна підсистема повинна мати достатню обчислювальну потужність для того, щоби за (1)—(3) визначити еквівалентний час експлуатації ТП.

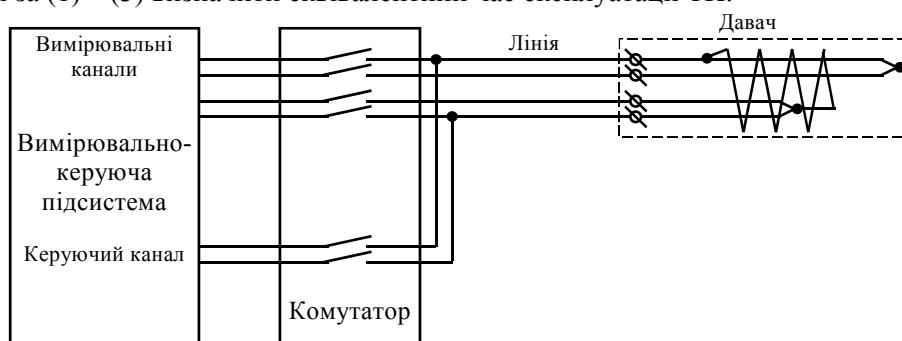


Рис. 3. Схема підключення пропонованого ТЕР із самотестуванням

Висновки

Як випливає з описаних схем, запропонована ТП із самотестуванням має нескладну конструкцію та використовує більшість деталей існуючих ТП, однак реалізує запропонований метод самотестування, яке можна провести практично в довільний момент — умовою проведення є сталість температури об'єкта вимірювання на час самотестування. Метод не використовує взір-

цеві засоби і може бути широко використаний для підвищення метрологічної надійності систем вимірювання та керування різноманітних термоагрегатів, особливо за потреби високої точності підтримання заданої температури.

Метод доцільно використовувати у вимірювальних та керувальних системах, давачі яких працюють у складних, недостатньо вивчених умовах, за наявності агресивних речовин, які можуть відносно швидко змінити ФП ТП. В цих умовах запропонований метод самотестування може значно підвищити метрологічну надійність вимірювальних та керувальних систем.

З викладеного можна зробити висновок, що простота конструкції ТП із самотестуванням отримана за рахунок ускладнення оброблення даних — визначення еквівалентного часу експлуатації вимагає розв'язання таких задач:

1. Побудови достатньо повної та точної математичної моделі похибки ТП (її електродів) як функції величин впливу на базі експериментальних досліджень. Далі необхідно розробити методи узагальнення цих даних та побудови математичних моделей похибки термоелектродів від потрібних величин впливу (тих, що діють в певному місці експлуатації ТП).

2. Створення методів опису зміни профілю температурного поля (див. рис. 1) з достатньою точністю за відомими потужністю (енергією) нагрівача, зміною температури в одній точці (визначається ТП 2) та конструкцією ТП (розмірами елементів і матеріалами, з яких вони виготовлені).

3. Розробки методики обчислення еквівалентного часу експлуатації ТП запропонованим методом на основі результатів виконання пп. 1, 2.

4. Оцінки похибки визначення еквівалентного часу експлуатації ТП запропонованим методом. Через відносно малу чутливість відомих ТП (від 8 до 70 мкВ/°С) точність визначення змін термо-е.р.с. ТП під дією величин впливу невисока, тому похибка визначення еквівалентного часу експлуатації ТП може бути досить велика. Можливо аналітичні обчислення змін профілю температурного поля при нагріванні (при реалізації п. 2) не дозволять визначити ці зміни достатньо точно (щоби отримати прийнятну похибку визначення еквівалентного часу експлуатації ТП), тоді необхідно розробити методику проведення відповідних експериментальних досліджень.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Перетворювачі термоелектричні. Номінальні статичні характеристики перетворення : ДСТУ 2837-94. — [Чинний від 1986-04-01] — К. : Держстандарт України, 1994. — (Національний стандарт України).
2. Fluke and Philips Catalog. 2006.
3. Термопреобразователи технических термоэлектрических термометров. Методы и средства поверки: ГОСТ 8.338-78 ГСИ. — [Чинний від 1999-01-01]. — Минск : ИПК Издательство стандартов 1998. — (Міждержавний стандарт).
4. Мильченко В. Ю. Исследование методов и разработка средств поверки термоэлектрических преобразователей из неблагородных металлов : автореф. дис. на соискание ученой степени канд. техн. наук : спец. 05.11.15 «Метрологическое обеспечение по отраслям» / В. Ю. Мильченко. — Москва, — 1984. — 25 с.
5. Васильків Н. М. Підвищення точності вимірювання температури термопарами в процесі експлуатації : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : 05.11.04 / Н. М. Васильків. — Львів, 2011. — 20 с.
6. Alf Hundves, Henz G. Buschfort. Self calibrating temperature sensing probe and probe — indicator combination-United State Patent 3.499.340. 73-1, G01 -15/00.
7. Саченко А. А. Измерение температуры датчиками со встроенными калибраторами / А. А. Саченко, В. Ю. Мильченко, Кочан В. В. — Москва : Энергоатомиздат, 1986. — 96 с.
8. Kortvelyessy L. Thermoelement Praxis / L. Kortvelyessy. — Vulkan-Verlag, Essen, 1981. — S. 498.
9. Пат. № 2262087, Российская федерация, МПК G01K 15/00. Способ бездемонтажной оценки достоверности показаний термоэлектрического преобразователя / Шевченко А. И., Каржавин В. А., Каржавин А. В., Белевцев А. В. — Заявл. 10 октября 2005 г.
10. Браилов Э. С. Определение погрешности измерения температуры встроенными термоэлектрическими термометрами / Э. С. Браилов, Ю. А. Скрипник, Г. В. Юрчик // Измерительная техника. — 1986. — № 5. — С. 20—22.
11. Столярчук В. П. Ідентифікація статичних та динамічних характеристик термоперетворювачів : автореф. дис. на здобуття наук. ступеня канд. техн. наук : спец. 05.11.04 «Прилади та методи вимірювання теплових величин» / В. П. Столярчук. — Львів. — 2012. — 20 с.
12. Датчики для измерения температуры в промышленности / [Г. В. Самсонов, А. И. Киц, О. А. Кюздени и др.] — К : Наукова думка, 1972. — 223 с.
13. Изменения термоэлектрической силы проволок из хромеля и алюмеля при нагреве на воздухе при 800°С продолжительностью до 10000 ч. Том III / [Н. А. Рогельберг, Э. Н. Пигидина, Г. Н. Покровская и др.] // Исследование сплавов для термометра : тр. института Гипроцветметобработка. — М. : Металлургия, 1969.
14. Оцінка максимальної похибки неоднорідних термопар / [О. В. Кочан, Р. В. Кочан, В. Я. Яскілка, Н. М. Васильків] // Вісник Тернопільського Державного Технічного Університету. — 2007. — № 1 — С. 122—129.
15. Заявка на патент № a201213269 Україна, G01k. Спосіб корекції похибки головної термопари на місці експлуатації та пристрій для його реалізації / Кочан О. В., Кочан Р. В. — Заявл. 21.11.2012.

16. Дослідження похибки вимірювання температури від набутої термоелектричної неоднорідності електродів термопар / [Н. М. Васильків, О. В. Кочан, В. В. Кочан, А. О. Саченко] // Вимірювальна техніка та метрологія. — 2009. — № 70. — С. 110—117.

17. Пат. № 97464 Україна, МПК G01K 15/00. Термоелектричний перетворювач / О. В. Кочан, Р. В. Кочан. — Заявл. 22.02.2007.

Рекомендована кафедрою метрології та промислової автоматики ВНТУ

Стаття надійшла до редакції 22.10.2013

Кочан Орест Володимирович — канд. техн. наук, доцент, науковий співробітник Науково-дослідного інституту інтелектуальних комп'ютерних систем, e-mail: orestvk@gmail.com.

Тернопільський національний економічний університет, Тернопіль

O. V. Kochan¹

Non-dismantling method of testing of thermocouples electrodes conditions

¹Ternopil National Economic University

The goal of this paper is to create the method of selftesting of thermocouples on operating place. This goal is achieved using equivalent operating time of thermocouples use. The method doesn't require replacement of thermocouples from operating place. It is provided during operation of thermocouples. The necessary condition that makes selftesting possible is constant hot junction temperature during procedure of selftesting. Determined equivalent operating time allows finding place of a given thermocouple in thermocouple drift model as well as in model of the thermoelectric inhomogeneity.

Key words: thermocouples, error due to inhomogeneity of thermocouples, testing on operating site.

Kochan Orest V. — Cand. Sc. (Eng.), Assistant Professor, Research Associate of Research Institute of Intelligent Computing Systems, e-mail: orestvk@gmail.com

O. B. Kochan¹

Бездемонтажный метод тестирования состояния электродов термоэлектрических преобразователей

¹Тернопольский национальный экономический университет

Создан метод тестирования состояния электродов термоэлектрических преобразователей на месте их эксплуатации путем определения эквивалентного времени эксплуатации. Метод не требует демонтажа термоэлектрических преобразователей, осуществляется в процессе их эксплуатации. Условием проведения тестирования является постоянство температуры рабочего конца на время тестирования. Полученное эквивалентное время эксплуатации термоэлектрического преобразователя позволяет определить его место в модели погрешностей из-за дрейфа функции преобразования и приобретенной в процессе эксплуатации термоэлектрической неоднородности.

Ключевые слова: термоэлектрические преобразователи, погрешность из-за неоднородности термопар, тестирование на месте эксплуатации.

Кочан Орест Владимирович — канд. техн. наук, доцент, научный сотрудник Научно-исследовательского института интеллектуальных компьютерных систем, e-mail: orestvk@gmail.com